

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

APLICAÇÃO DE FLOCOS DE GRAFENO MULTICAMADAS NO TORNEAMENTO DE  
ACABAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 420 C ENDURECIDO

por

Pablo Roberto Rovani

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, 19 dezembro de 2019.

Rovani, Pablo Roberto  
APLICAÇÃO DE FLOCOS DE GRAFENO MULTICAMADAS NO  
TORNEAMENTO DE ACABAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 420 C  
ENDURECIDO / Pablo Roberto Rovani. -- 2019.  
19 f.  
Orientador: André João de Souza.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de  
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto  
Alegre, BR-RS, 2019.

1. Vida da ferramenta. 2. Torneamento do AISI 420 C  
endurecido. 3. Quantidade reduzida de fluido. 4.  
Flocos de grafeno multicamadas. I. de Souza, André  
João, orient. II. Título.

Pablo Roberto Rovani

APLICAÇÃO DE FLOCOS DE GRAFENO MULTICAMADAS NO TORNEAMENTO DE  
ACABAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL AISI 420 C ENDURECIDO

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS  
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
**ENGENHEIRO MECÂNICO**  
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Mario Roland Sobczyk Sobrinho  
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de concentração: **Processos de Fabricação.**

Orientador: Prof. Dr. André João de Souza

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. André João de Souza

Prof. Dr. Patric Daniel Neis

Prof. Dr. Tiago Becker

Porto Alegre, 19 de dezembro de 2019.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. André João de Souza, pela orientação, disposição e didática. A motivação para este trabalho teve início nas aulas da disciplina ENG03343 – Processos de Fabricação por Usinagem, por ele ministrada.

À minha esposa, Elisa Schubert, por ser a pessoa mais maravilhosa que eu já conheci.

Ao meu pai, Valdir Rovani, pelo exemplo de humanismo, força e por toda sua dedicação para comigo.

Aos verdadeiros amigos, que da forma particular e peculiar de cada um, compartilham comigo um pouco da sua existência.

Aos colegas do LAUS, em especial, ao Guilherme Vargas Schirmer, pela amizade, disposição e ensinamentos práticos de grande valia. Também ao Wilson Trindade Urasato e ao Lourenço Rad Miranda, pelo apoio na realização dos ensaios de torneamento.

Ao LAPMA e ao LACER, pela disponibilidade de suas infraestruturas. E aos colegas que colaboraram com a realização de análises experimentais em suas dependências, em especial, ao João Vítor dos Santos Ritter e ao Wilbur Trajano Guerin Coelho.

Aos professores e funcionários da Engenharia Mecânica da UFRGS, cujos esforços permite a existência de um curso gratuito e de excelência.

Aos colegas de graduação, por construirmos juntos a base das nossas carreiras, contribuindo mutuamente ao longo de todo o curso.

À empresa Walter Tools, pela generosa doação dos insertos usados neste trabalho.

Agradeço, por fim, a todas as pessoas que de alguma maneira contribuíram na realização deste trabalho.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO – 2019

**APLICAÇÃO DE FLOCOS DE GRAFENO MULTICAMADAS NO  
TORNEAMENTO DE ACABAMENTO DO AÇO INOXIDÁVEL  
AISI 420 C ENDURECIDO**

**ROVANI, Pablo Roberto**  
e-mail: rovani.pr@gmail.com

**Resumo.** *Visando observar os efeitos da aplicação de reduzida quantidade de lubrificante (RQL) e a sua combinação com flocos de grafeno multicamadas (MLG) no tempo de vida de um inserto de metal-duro revestido por PVD, foram torneados três corpos de prova de aço inoxidável martensítico AISI 420 C endurecido a 55 HRC (este sendo escolhido pela sua importância como matéria-prima). Foram, então, coletados dados sobre desgastes da ferramenta, forças de usinagem, rugosidade e cavaco formado em três condições de lubrificação-resfriamento (fluido de corte em abundância (WET), RQL e RQL+MLG). O comportamento das curvas de vida na condição RQL foi análogo à condição WET. Porém, RQL+MLG produziu um desgaste mais severo. De forma geral, o mesmo vale para as forças. As rugosidades média e total observadas para a condição RQL foram as que apresentaram maior homogeneidade, enquanto que RQL+MLG teve a maior dispersão de valores. Os cavacos apresentaram uma geração contínua e em forma de hélice plana. Assim, verificou-se que a aplicação RQL foi a condição mais adequada, enquanto o emprego de MLG se mostrou inviável.*

**Palavras-chave:** *vida da ferramenta; torneamento do AISI 420 C endurecido; quantidade reduzida de fluido; flocos de grafeno multicamadas.*

**Abstract.** *Aimed to observe the effects of reduced quantity lubrication (RQL), and its combination with multilayer graphene flakes (MLG) on the lifetime of a PVD-coated carbide insert, three 55 HRC hardened AISI 420 C martensitic stainless-steel workpieces were turned (this being chosen for its importance as a raw material). Data were then collected on tool wear, machining forces, surface roughness, and chip formed under three lubrication-cooling conditions (cutting fluid in abundance (WET), RQL, and RQL+MLG). The behavior of tool life curves in the RQL cutting was analogous to the WET cutting. However, the RQL+MLG produced more severe tool wear. In general, the same occurred on the machining forces. The average and total roughness observed for the RQL condition presented the highest homogeneity, while RQL+MLG had the highest dispersion of values. The chips presented a continuous generation and in the form of a flat helix. With this set of information, it was found that the RQL turning was the most suitable condition, while the use of MLG was impracticable.*

**Keywords:** *tool life; hardened AISI 420 C turning; reduced quantity lubrication; multilayer graphene flakes.*

## 1. INTRODUÇÃO

O AISI 420 C é um aço ligado ao cromo, inoxidável, martensítico, temperável e ferromagnético com alta resistência mecânica até temperaturas da ordem de 400°C e boa resistência à oxidação até 610°C. Quando temperado e revenido, alcança durezas em torno de 55 HRC. Não apresenta boa capacidade de conformação a frio, sendo necessário um pré-aquecimento entre 200 e 400°C, para melhorar seu desempenho para este fim. A característica de resistência à oxidação pode ser melhorada mediante a utilização de superfícies limpas e polidas, sendo necessário, portanto, a remoção de

carepas formadas nas operações de soldagem, tratamentos térmicos, ou conformações a quente. Deve-se evitar revenimento na faixa de temperatura entre 425 e 525°C, onde ocorre a fragilização do material (Favorit, 2019). Este é utilizado nas mais variadas aplicações, como para a confecção de discos de freio, de componentes de turbinas aeronáuticas, de ferramentas cirúrgicas, na cutelaria etc. (Boniardi e Casaroli, 2014).

Por ser um aço que pode atingir altos valores de dureza e ainda apresentar boa ductilidade, o AISI 420 C causa uma alta taxa de desgaste em torneamento, limitando o tempo de vida das ferramentas de corte, fazendo necessário o emprego de insertos com características especiais, que, via de regra, apresentam custos elevados. Também como consequência disso, a operação de corte gera esforços maiores que, além de exigir máquinas-ferramenta rígidas, causa impacto na rugosidade da peça usinada e na geração do cavaco (Rosa, 2017).

A usinagem de acabamento de aços endurecidos exige ferramentas de corte de alta dureza e de alta resistência térmica. Por outro lado, o AISI 420 C mantém sua ductilidade mesmo após o tratamento térmico. Segundo Machado *et al.*, 2015, o metal-duro (carboneto de tungstênio ligado ao cobalto) combina as durezas em temperatura ambiente e a quente, resistência ao desgaste e tenacidade, apenas pela variabilidade de sua composição. Sandvik, 2012, cita que o desenvolvimento de ferramentas de metal-duro com grãos de WC extrafinos ( $< 1 \mu\text{m}$ ) e ultrafinos ( $< 0,5 \mu\text{m}$ ) garante a essas ferramentas uma melhoria expressiva destas propriedades, além de menor tendência à aderência em comparação às ferramentas com grãos em tamanhos convencionais.

Em teoria, isso garante que ferramentas de metal-duro com grãos de WC menores que  $1 \mu\text{m}$  possam ser aplicadas em torneamento duro, desde que possibilitem a geração de padrões de tolerâncias compatíveis com ferramentas de PCBN e cerâmicas (Klocke, 2011). Rosa, 2017, afirma que insertos com grãos ultrafinos são utilizadas para aplicações em que sua alta resistência a microlascamentos e alta dureza a quente apresentem vantagem na usinagem de aços inoxidáveis, superligas resistentes ao calor e ligas de titânio. A desvantagem é que possuem maior tendência a falhar por craterização que outras ferramentas.

Klocke, 2011, salienta o ganho de eficiência de insertos de metal-duro revestidos. A função principal da camada de material de alta dureza do revestimento é inibir o contato ferramenta-peça, reduzindo o desgaste causado por diferentes mecanismos tais como aderência e arrastamento (*attrition*), abrasão, difusão e oxidação. Enquanto a cobertura melhora a resistência ao desgaste e diminui a adesão entre os materiais da peça e da ferramenta, o substrato atua como suporte de dureza e tenacidade para o revestimento. No entanto, Noordijn *et al.*, 2012, verificaram que a ferramenta de metal-duro revestido resistiu ao torneamento duro, mas não foi capaz de realizar de maneira eficaz a operação de corte utilizando altas velocidades de corte devido à baixa dureza a quente do material.

Conforme Tschätsch, 2009, a vida da ferramenta é o período de tempo (expresso em minutos) para qual a aresta de corte, afetada pelo processo de usinagem, mantém sua capacidade de corte durante a operação, permanecendo funcional até certa quantidade de desgaste previamente definido, em função de um critério preestabelecido. Davim, 2008, cita que o próprio desgaste da ferramenta é frequentemente utilizado como critério de fim de vida pela sua facilidade de ser determinado quantitativamente e por influenciar a rugosidade e a precisão dimensional da peça. Smith, 2008, complementa dizendo que a abrasão (mecanismo que predominantemente gera o desgaste de flanco) é considerada como “tribologicamente” normal, visto que este desgaste pode ser tolerado e tratado através de uma estratégia de troca de ferramenta baseada em uma expectativa de vida.

A vida da ferramenta de corte é impactada também pela presença do desgaste de entalhe ( $VB_N$ ). Souza, 2011, cita que o entalhe aparece sempre nas regiões coincidentes com as laterais do cavaco (superfície de saída ou de folga) da ferramenta na usinagem de materiais de difícil corte (aços endurecidos, aços austeníticos, superligas resistentes ao calor, ligas de titânio, etc.) que geram variação da espessura do cavaco durante a sua formação (bordas serrilhadas típicas de cavacos lamelares e cisalhados). O desgaste de entalhe é devido principalmente aos mecanismos de desgaste por abrasão e por *attrition*, fenômenos bastante influenciados pelas interações com a atmosfera (Trent

e Wright., 2000). O fluxo irregular do cavaco devido às baixas velocidades de corte facilita o *attrition*. No caso, fragmentos microscópicos são arrancados da superfície da ferramenta e arrastados junto ao fluxo de material adjacente à interface peça-ferramenta (Diniz *et al.*, 2013; Machado *et al.*, 2015).

O uso do fluido de corte traz benefícios ao processo de usinagem como refrigerar e lubrificar a zona de corte, reduzindo a severidade dos contatos nas interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça ao alterar favoravelmente as condições tribológicas locais, diminuindo as taxas de desgaste e aumentando a vida da ferramenta (Debnath *et al.*, 201; Astakhov, 2008). Por outro lado, há desvantagens no seu uso, como custos elevados (aquisição, armazenamento e descarte), perigo para a saúde do operador (fluidos à base de óleos minerais) e para o meio ambiente (poluição ambiental). O ideal seria a não utilização dos fluidos de corte ou minimizar o seu uso (Diniz *et al.*, 2013; Dixit *et al.*, 2012). Dependendo do processo, o uso reduzido (RQL) ou mínimo (MQL) de fluido de corte é considerado um passo intermediário importante sob o ponto de vista ambiental, além de promover as características positivas geradas pela aplicação por métodos tradicionais (isto é, em abundância) (Çakır *et al.*, 2009). Souza *et al.*, 2016, classifica as aplicações de acordo com a vazão ( $q$ ) empregada: usinagem quase-seca ( $q < 50$  ml/h), MQL ( $50$  ml/h  $< q < 500$  ml/h) e RQL ( $500$  ml/h  $< q < 5$  l/h).

Uma técnica, de particular interesse e associada à RQL, é a adição de Multicamadas de Grafeno (*MultiLayer Graphene* – MLG) ao fluido de corte, formando um nanofluido. O grafeno é a unidade básica das estruturas do grafite, das fibras e dos nanotubos de carbono, assim, o MLG pode ser descrito como um material cuja estrutura é formada por anéis hexagonais de átomos de carbono, em dimensões nanométricas (Fonseca, 2011; Novoselov, 2011).

Já a força de usinagem é influenciada pelo material da peça, pelo material, geometria e estado da ferramenta, e também pelos parâmetros de corte. Essa força possui três componentes ortogonais que agem diretamente na cunha cortante, e, por conseguinte, na máquina-ferramenta. A parcela tangencial projetada sobre o plano de corte é a força de corte ( $F_c$ ). Geralmente é a força de maior intensidade no torneamento e também o principal fator de cálculo da potência necessária ao corte. A parcela normal à direção de corte projetada sobre o plano de avanço é a força de avanço ( $F_f$ ). A componente radial projetada na direção perpendicular ao plano de trabalho é a força passiva ( $F_p$ ) ou de profundidade (Souza, 2011). Os conhecimentos sobre a força de usinagem que age sobre a cunha cortante e sobre suas componentes são de grande importância, pois possibilitam estimar a potência necessária para o corte, bem como os esforços atuantes nos elementos da máquina-ferramenta, além de manter uma relação direta com os desgastes das ferramentas de corte, influenciando a viabilidade econômica do processo (Machado *et al.*, 2015).

Como produto da sobreposição de efeitos como os de torneamento, ou de falhas apresentadas pela ferramenta de corte, o acabamento de uma superfície usinada é, geralmente, levado em consideração nas aplicações para qual uma peça é projetada. Este acabamento é comumente definido pela textura, que é constituída por rugosidades, ondulações, marcas e falhas na superfície. Rugosidades são irregularidades superficiais microgeométricas resultantes da ação de corte (marcas de avanço). Ondulações são irregularidades superficiais macrogeométricas causadas por vibrações e flexões da ferramenta e/ou da peça devido à força de usinagem, temperatura de corte ou erros de fixação da peça ou ferramenta. Marcas de avanço denotam as direções predominantes das irregularidades superficiais; elas dependem da orientação da peça e da ferramenta de corte na máquina e da natureza do movimento relativo entre as duas. Falhas são interrupções não-intencionais, inesperadas e indesejáveis na topografia típica da superfície de um componente causadas por defeitos inerentes ao material (inclusões, trincas, bolhas) ou podem surgir durante o corte (Machado *et al.*, 2015).

Em qualquer processo de usinagem, a formação do cavaco pode ser explicada segundo o modelo do corte ortogonal, de Sultan *et al.*, 2015. Este diz que o cavaco começa a ser formado no início da penetração da ferramenta no material, que sofre deformações elásticas e plásticas até um momento crítico, quando, normalmente por cisalhamento, ocorre a ruptura e a propagação da trinca. Essa ruptura será parcial ou completa frente a penetração contínua da ferramenta, e o material deixa a região de corte escorregando sobre a superfície de saída da ferramenta (Machado *et al.*, 2015).

Como as demandas atuais exigem melhores desempenho nos processos de fabricação, seja por motivações financeiras ou implicações ecológicas, entre outras, a compreensão de particularidades no torneamento de aços especiais se tornou um assunto de grande importância (Souza *et al.*, 2001). Assim, este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) visou estudar a influência de métodos alternativos de lubrificação, em termos da quantidade aplicada e composição, no tempo de vida de um inserto de metal-duro revestido por PVD, através do torneamento do aço inoxidável martensítico AISI 420 C endurecido a 55 HRC. Em especial, avaliou-se o efeito da aplicação em RQL e da adição de MLG nessa condição em comparação com o método tradicional (fluido em abundância). Uma vez posto o objetivo central deste trabalho e contextualizadas as questões técnicas e científicas, foram planejados os ensaios a serem realizados, tendo em vista, principalmente, três embasamentos teóricos para as avaliações, são eles: os esforços do torneamento, a observação do tempo de vida e dos mecanismos de desgaste da ferramenta e a influência do meio lubrificante.

### 1.1. Flocos de Grafeno Multicamadas

O grafeno é considerado um material cristalino bidimensional e é formado exclusivamente por átomos de carbono ligados em uma estrutura hexagonal (Fonseca, 2011; Novoselov, 2011). Devido às suas propriedades permitirem uma multifuncionalidade, este tem apresentado um interesse crescente em diferentes áreas do conhecimento e aplicações, tais como condutividade térmica de cerca de 5000 W/m·K (Balandin *et al.*, 2008), módulo de elasticidade de 1000 GPa, tensão de ruptura de 130 GPa (Lee *et al.*, 2008), impermeabilidade a qualquer gás e por correntes elétricas extremas (Novoselov *et al.*, 2012). Como fruto da reunião de todas essas características, o grafeno vem sendo empregado no desenvolvimento de materiais compósitos (Hu *et al.*, 2017), em bateria e supercapacitores (Ye *et al.*, 2018), em dispositivos fotovoltaicos (Mahmoudi *et al.*, 2018) e, inclusive, na biologia (Lasocka *et al.*, 2018; Li *et al.*, 2018; Justino *et al.*, 2017; Nag *et al.*, 2017).

Nos últimos anos tem-se estudado o uso de partículas sólidas associadas aos fluidos de corte, que vão além do emprego do grafeno, como uma alternativa que visam favorecer as condições de usinagem. Como regra geral, as partículas sólidas que são combinadas a estes fluidos são de escala nanométrica, formando, assim, nanofluidos lubrificantes, e são aplicadas com sistemas que utilizam a quantidade reduzida de fluido (Benedicto *et al.*, 2017). Alguns dos trabalhos desenvolvidos no LAUS foram feitos com o emprego dessa técnica (Carvalho, 2018; Carvalho *et al.*, 2019).

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios de vida da ferramenta consistiram do torneamento longitudinal externo de acabamento em corpos de prova cilíndricos (30 mm de diâmetro e 120 mm de comprimento) de aço inoxidável martensítico AISI 420 C temperados e revenidos a uma dureza de  $(55,2 \pm 0,5)$  HRC. A composição química é exibida na Tabela 1 (Rosa, 2017) e a Figura 1 o desenho esquemático dos corpos de prova.

Tabela 1 – Composição química do aço AISI 420 C utilizado neste trabalho (% Massa).

Fe	Cr	Ni	C	Si	Mn	Mo	P	S
86,50	12,10	0,37	0,33	0,26	0,25	0,09	0,01	0,01

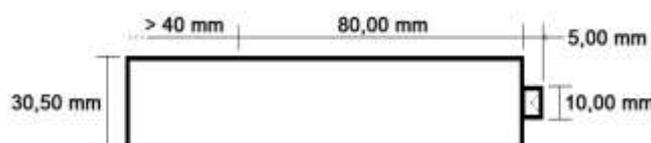


Figura 1 – Desenho esquemático dos corpos de prova antes de serem usinados.

Um comprimento superior a 40 mm foi reservado em uma das extremidades dos corpos de prova de modo a haver espaço o suficiente para a fixação rígida nas castanhas do torno. Na outra extremidade, foi feito um rebaixo de diâmetro (10 mm de diâmetro e 5 mm de comprimento) com furo de centro para que o suporte do inserto não colidisse com o contra-ponto na entrada da ferramenta quando a peça estivesse com diâmetro menor. Além disso, um sobremetal (0,50 mm no diâmetro) foi deixado na barra para ser usinado como um passe precursor, de maneira a evitar que, por uma eventual falta de centragem, houvesse alguma diferença na profundidade de corte do primeiro passe. A Figura 2a apresenta imagens dos corpos de prova em estado bruto e preparado para os ensaios.

Os ensaios foram realizados no torno CNC Mazak modelo Quick Turn Nexus 100-II (Fig. 2b), disponível no Laboratório de Automação em Usinagem (LAUS) da UFRGS.



Figura 2 – (a) Foto do corpo de prova antes e após ser preparado para os ensaios; (b) Foto do torno CNC Mazak QTN 100-II presente no LAUS-UFRGS

A ferramenta utilizada foi um inserto de metal-duro Walter Tools tipo TNMG160404-NMS WSM01, com grãos ultrafinos ( $< 0,5 \mu\text{m}$ ), raio de ponta  $r_\epsilon = 0,4 \text{ mm}$  e revestimento PVD/TiAlN (HiPIMS). Os detalhes do inserto podem ser vistos na Figura 3. O porta-ferramentas DTJNL 2020 K16 usado tem ângulo de posição  $\chi_r = 93^\circ$  e ângulos de saída ( $\gamma$ ) e inclinação ( $\lambda_s$ ) negativos ( $-6^\circ$ ).

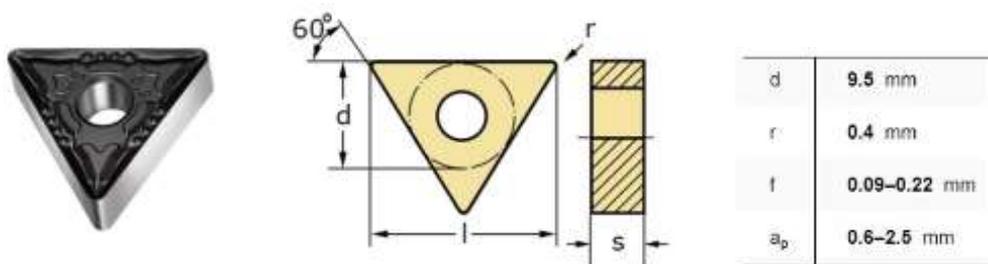


Figura 3 – Características do inserto utilizado (Walter Tools, 2019).

Visando contemplar os objetivos deste trabalho, três diferentes condições de lubrificação foram utilizadas de forma que os seus efeitos pudessem ser diretamente comparados entre si: a) fluido em abundância (WET), b) RQL (*reduced quantity lubrication*), c) RQL + MLG (*reduced quantity lubrication* acrescido de *multilayer graphene*). O fluido empregado na condição WET (método convencional) com diluição em volume de água de 5% foi o BD-Fluid B90, da Bondmann Química.

Segundo o fabricante, este é um biolubrificante isento de óleos de qualquer natureza, com capacidade de lubrificar e refrigerar similar aos óleos integrais (Bondmann, 2019).

Para as condições RQL e RQL+MLG, o fluido utilizado foi o Quimatic Jet. Segundo o fabricante, este é um fluido sintético integral à base de água, especialmente formulado para ser aplicado através da formação de névoa (Quimatic, 2019). Neste caso, foi aplicado com o auxílio do Nebulizador IV da mesma empresa a uma vazão de 1,75 l/h e uma pressão de 3 bar na linha de ar comprimido. No caso RQL+MLG, se repetiu as condições do RQL, porém com o acréscimo de 0,5% em massa de nanopartículas de grafeno multicamadas.

Além das dimensões e durezas dos corpos de prova, também foram mantidas constantes nos três ensaios de vida as condições de corte (isso para que a única variável fosse a condição de lubrificação). A Tabela 2 apresenta as dimensões e os parâmetros de corte empregados.

Tabela 2 – Dimensões e condições de usinagem empregadas no torneamento dos três corpos de prova ensaiados.

Parâmetro	$D_i$ [mm]	$D_f$ [mm]	$l_m$ [mm]	Nº de Passes	$f$ [mm/rev]	$a_p$ [m/mm]	$v_c$ [m/min]	$t_r$ [min]
Condição	30	15	80	25	0,10	0,30	100	14

Em cada corpo de prova foram realizados 25 passes de 80 mm cada (2,0 m de comprimento usinado), resultando em um tempo total de usinagem de aproximadamente 14 min.

## 2.1. Medições das Variáveis de Saída

Os desgastes dos insertos, as forças ocorridas durante o corte, as rugosidades resultantes do processo e os cavacos gerados foram analisados através de métodos específicos.

### 2.1.1. Medição dos desgastes

As imagens dos insertos foram captadas através do microscópio digital USB Dino-Lite modelo AM-413ZT, com ampliação de 50x, acoplado a um computador e controlado por software dedicado. Estas foram obtidas a cada passe a fim de registrar a evolução do desgaste na ferramenta. Tais imagens foram tomadas com o inserto em posições que visam melhor indicar os locais de desgaste. A Figura 4 mostra as imagens capturadas do inserto antes da experimentação nas perspectivas de: (a) flanco (ou folga); (b) ponta; e (c) face (saída). Nota-se que linhas foram criadas para facilitar o posicionamento do inserto nos diferentes panoramas. A Figura 5 mostra a configuração utilizada.

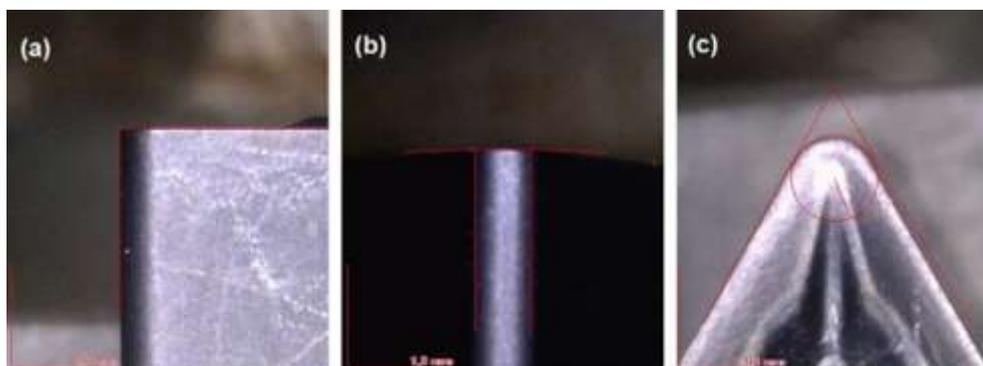


Figura 4 – Medição dos desgastes do inserto, com ampliação de 50x: (a) flanco; (b) ponta; (c) face.

Embora as imagens dos insertos tenham sido captadas nas três perspectivas para todos os passes das três peças usinadas, exemplificadas na Figura 4, apenas foi possível obter informações quantitativas através da avaliação do desgaste de ponta. Sendo, então, estas as únicas a serem apresentadas nos resultados.



Figura 5 – Sistema de aquisição de imagens pelo microscópio AM-413ZT.

### 2.1.2. Medição das forças

O sistema de aquisição disponível no LAUS-UFRGS foi utilizado para aquisição dos dados de força durante os ensaios de vida. Este sistema é constituído de um dinamômetro piezelétrico Kistler modelo 9129A que registra simultaneamente três componentes ortogonais de força, que estão esquematicamente descritos na Figura 6(a): força passiva ( $F_p$ ); força de corte ( $F_c$ ) e força de avanço ( $F_f$ ). Os sinais de força são amplificados e filtrados através de um condicionador Kistler, modelo 5070A10100. Após o condicionamento, os sinais são processados através de uma placa DAQ conectada ao computador que, através do LabVIEW 9.0, faz a interface com o usuário. Esse sistema pode ser visto na Figura 6(b).



Figura 6 – (a) Dinamômetro piezelétrico Kistler 9129A instalado no torno CNC;  
(b) Sistema monitor.

No caso, as magnitudes das forças  $F_p$ ;  $F_c$  e  $F_f$  foram adquiridas nos primeiros cinco segundos de cada passe, a uma taxa de aquisição de 10 000 pontos por segundo (10 kHz).

### 2.1.3. Medição das rugosidades

As rugosidades geradas na superfície durante a usinagem foram registradas a cada passe em três posições diferentes da peça (girando a peça em cerca de 120°), em todos os 25 passes realizados, através do rugosímetro Mitutoyo modelo SJ-201P com resolução de 0,01  $\mu\text{m}$  (Fig. 7). A agulha do

apalpador possui raio de ponta de 5  $\mu\text{m}$  e aplica uma força de 4 mN durante a medição. As medidas foram tomadas utilizando um comprimento de amostragem  $l_e = 0,8$  mm e um comprimento de medição  $l_m = 4$  mm, com velocidade de varredura de 0,25 mm/s. Os dados coletados foram computados por um *software* dedicado (SJ Tools) que permite a análise gráfica da distribuição de picos e vales gerados na superfície gerada pelo processo de torneamento. No caso, foram avaliados os parâmetros de rugosidade média ( $R_a$ ) e total ( $R_t$ ).



Figura 7 – Medição em peça torneada com rugosímetro Mitutoyo SJ-201P.

#### 2.1.4. Medição dos cavacos

Embora tenha se recolhido os cavacos gerados pelos 25 passes efetuados em casa peça, apenas alguns desses foram analisados quanto à sua geometria, via microscopia óptica. Para isso utilizou-se o microscópio Zeiss, modelo Axiotech, com uma câmera JVC, modelo TK-1270 Color (Fig. 8), sem ampliação para análise de geometria e com ampliação de 20 vezes em casos particulares.



Figura 8 – Microscópio Zeiss Axiotech

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao longo da vida das ferramentas em torneamento sob diferentes condições lubrificantes (WET, RQL e RQL+MLG), utilizando as condições de corte constantes ( $v_c = 100$  m/min,  $f = 0,1$  mm/volta e  $a_p = 0,3$  mm), os desgastes dos insertos, as forças de usinagem, as rugosidades das superfícies usinadas e os cavacos gerados foram avaliados.

### 3.1. Desgaste e Vida da Ferramenta

Ao final de cada passe realizado no torneamento, o inserto foi fotografado com ampliação de 50 vezes a fim de se avaliar a taxa de desgaste causado pelo corte. A Figura 9 mostra a magnitude do desgaste da ponta do inserto ( $VB_C$ ) em função do tempo de usinagem para as três condições de lubrificação aplicadas, neste caso, 14 minutos foi o tempo de usinagem estabelecido como fim da vida da ferramenta. Os modelos de regressão que permitem o melhor ajuste das curvas de vida encontradas são mostrados na Tabela 3.

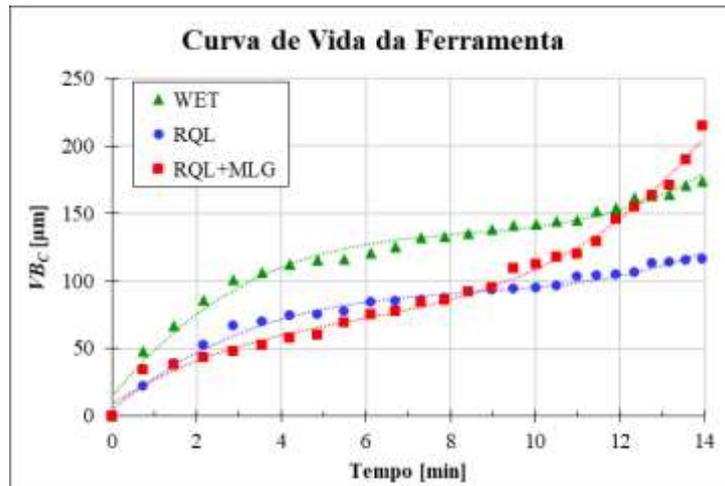


Figura 9 – Variação do desgaste de ponta do inserto em função do tempo de corte para as três condições de lubrificação

Tabela 3 – Equações e valores dos parâmetros obtidos para as equações de regressão.

	$VB_C = a \cdot t_c^3 + b \cdot t_c^2 + c \cdot t_c$		
	▲ WET	● RQL	■ RQL+MLG
<b>a</b>	0,2093	0,1228	0,1737
<b>b</b>	-5,2461	-3,1357	-3,1505
<b>c</b>	45,448	28,563	24,934
<b>R<sup>2</sup></b>	97,36%	98,67%	98,94%

A condição WET propiciou maior desgaste até o passe 21, e o crescimento de  $VB_C$  não foi acelerado. Até o passe 14, as condições RQL (com e sem MLG) apresentaram comportamentos semelhantes em relação ao desgaste  $VB_C$ . Porém, após o passe 14, o crescimento de  $VB_C$  foi acelerado para a condição com MLG, ultrapassando inclusive os níveis de desgaste obtidos com a condição WET após o passe 21. Sendo os passes 7, 14, 21 e 25 aqueles que demonstram essas observações, a Figura 10 apresenta imagens dos desgastes acumulados após a realização de cada um deles.

### 3.2. Forças de Usinagem

Os valores das três componentes ortogonais da força de usinagem (passiva  $F_p$ , de corte  $F_c$ , de avanço  $F_f$ ), foram registradas nas três condições de lubrificação (WET; RQL; RQL + MLG). Os gráficos das variações dessas grandezas em função do tempo de corte são exibidos na Figura 11.

Exclusivamente do ponto de vista dos valores das forças, nota-se que, como comportamento geral, ou seja, observado de forma análoga nas três grandezas, a aplicação de lubrificante em RQL é uma alternativa viável, visto que os esforços de usinagem resultantes na aplicação dessa técnica são

comparáveis aos esforços correspondentes com a aplicação do fluido em abundância. No entanto, a adição de multicamadas de grafeno (RQL+MLG) no meio lubrificante acarretou em uma elevação das forças, que causa um pequeno aumento na força de avanço e, mais acentuadamente em longos tempos devido ao desgaste acumulado da ferramenta, na força passiva.

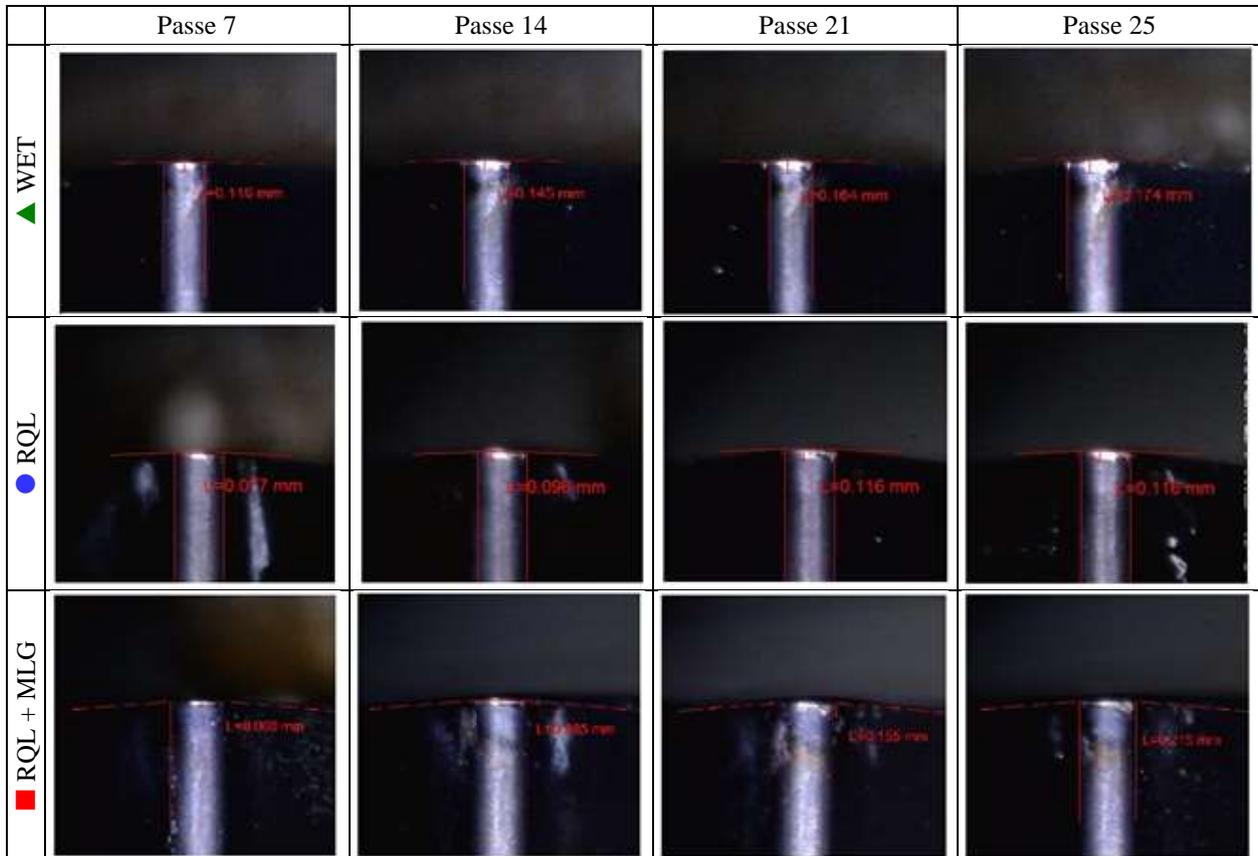


Figura 10 – Imagens do desgaste de ponta acumulados ao fim dos passes 7, 14, 21 e 25 nas três condições de lubrificação, feitas com 50 vezes de amplificação.

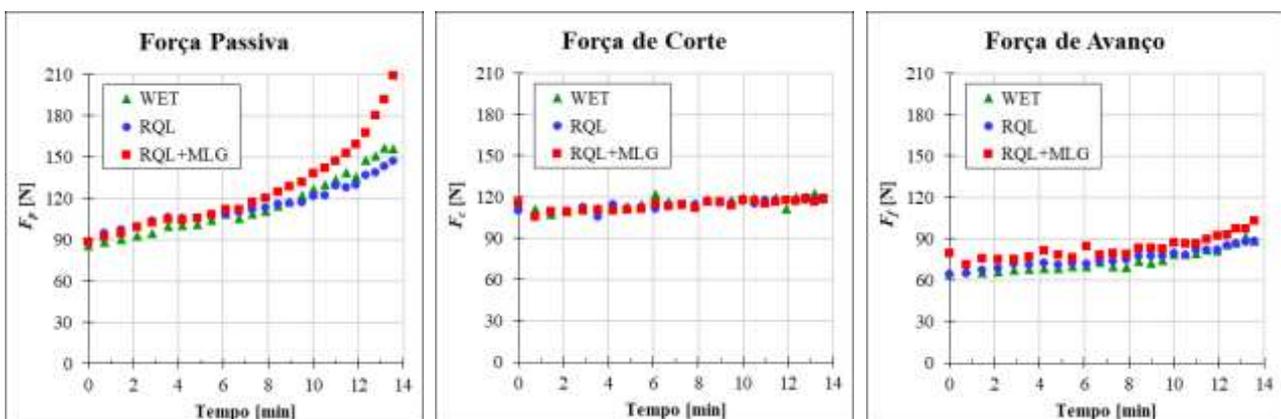


Figura 11 – Variação da média das componentes ortogonais da força de usinagem em função do tempo de corte para as três condições de lubrificação.

Em termo das magnitudes das forças registradas, percebe-se que a  $F_f$  é significativamente menor que as duas demais. Enquanto  $F_f$  em geral não ultrapassa 100 N, mesmo no caso mais severo, as  $F_c$

começam em 100 N e crescem quase linearmente até valores de 125 N; e  $F_p$  tem um comportamento crescente ainda mais amplificado, o que pode ser explicado devido ao fato do material usinado ser endurecido, apresentando baixa elasticidade, o que dificulta a deformação do cavaco e, também por ter mais alta dureza, provoca uma taxa de desgaste maior, que resulta numa área de contato da ferramenta com a peça maior, aumentando a  $F_p$ .

### 3.3. Rugosidades

Assim como as forças, as rugosidades foram obtidas durante o próprio processo de torneamento, tomadas ao final de cada passe, em três locais distintos (defasagem de  $120^\circ$ ). A Figura 12 mostra a média dos valores registrados para as rugosidades média ( $R_a$ ) e total ( $R_t$ ) nas três condições de lubrificação investigadas. Sendo que os valores teóricos obtidos foram  $R_{a-th} = 0,80 \mu\text{m}$  e  $R_{t-th} = 3,12 \mu\text{m}$ .

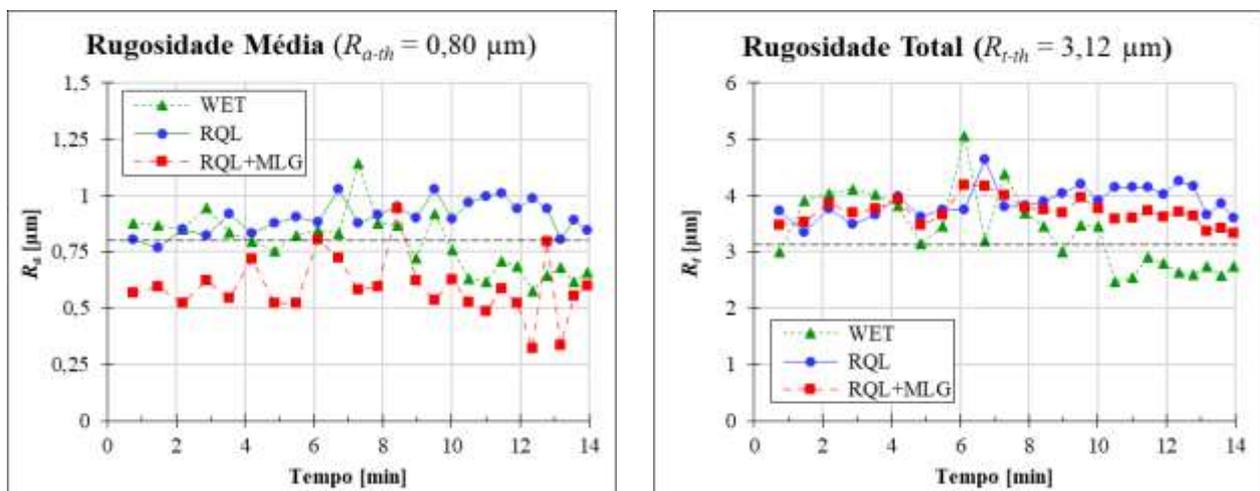


Figura 12 – Variação da média das rugosidades média e total em função do tempo de corte para as três condições de lubrificação.

Em termos da rugosidade média ( $R_a$ ), percebe-se que a condição de lubrificação RQL é aquela que apresentou a maior homogeneidade ao longo dos passes, ou seja, os valores que menos variaram, o que é um reflexo da pouca variação dos desgastes observados, embora seja de uma magnitude relativamente maior dentre as três condições testadas. Por outro lado, a condição RQL+MLG apresentou uma dispersão maior de valores, porém oscilando em torno de um valor médio menor. Assim, esta foi a que apresentou os menores valores de rugosidade da superfície usinada. Esse comportamento está associado ao fato de a rugosidade depender do formato do desgaste. À medida que o desgaste se acumula, este vai deformando o raio de ponta da ferramenta que, se tornando maior, aumenta também a superfície de contato peça-ferramenta e diminui os picos de rugosidade.

Já as magnitudes da rugosidade total ( $R_t$ ) oscilaram quase indistintamente às condições de lubrificação durante os primeiros passes. Notou-se que nos passes finais, a rugosidade para a condição WET decaiu devido ao aumento do raio de ponta causado pelo severo desgaste nessa condição, ao passo em que se manteve aproximadamente constante para as demais condições.

### 3.4. Forma dos Cavacos

Os cavacos gerados no processo de usinagem foram recolhidos em todos os passes dados, para os três corpos de prova ensaiados. Em uma análise geral, estes demonstraram características comuns e bastante uniformes em função do tempo de usinagem. Para elucidar essa regularidade de

comportamento, foram escolhidas as imagens, em tamanho real, dos cavacos recolhidos ao fim dos passes 1, 7, 14 e 25 para exibir na Figura 13.

De forma geral, a geometria dos cavacos obtidos em todas as condições de lubrificação pode ser classificada como sendo de geração contínua e de hélice plana. Porém, nota-se que as distâncias entre as hélices são aproximadamente as mesmas para as condições WET e RQL, e um pouco maiores para a condição RQL+MLG.

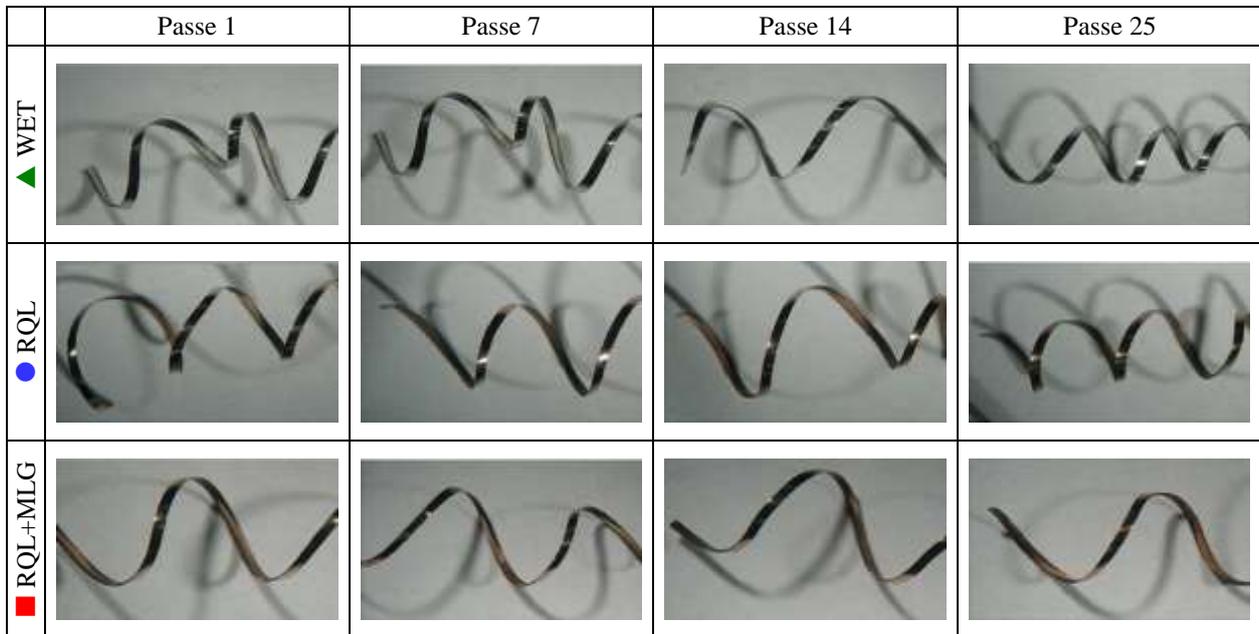


Figura 13 – Imagens em tamanho real dos cavacos coletados nos passes 1, 7, 14, e 25 nas três condições de lubrificação.

Outra consideração a se fazer é sobre a cor dos cavacos, que na condição WET é a mesma da cor da peça usinada, mas adquire uma coloração mais escura nas condições RQL e RQL+MLG, dando a entender que há uma deficiência da retirada de calor na zona de corte.

A fim de avaliar as bordas dos cavacos, foram feitas fotos com ampliação de 20x. Também quanto a esta característica, observou-se comportamento similar para todas as condições lubrificantes. A Figura 14 traz alguns exemplos dessas imagens, tomadas dos cavacos gerados após o passe 1.



Figura 14 – Imagens com amplificação de 20x dos cavacos coletados após o primeiro passe dado, nas três condições de lubrificação.

Com a ampliação, vê-se que os cavacos apresentam superfície lisa para os três casos e as bordas apresentam um formato serrilhado, cujas características mais típicas deste são observadas para as condições RQL e RQL+MLG. No caso WET, a borda apresenta uma condição intermediária entre a serrilhada e a lisa. Isso pode indicar que as condições de corte não são tão favoráveis, uma vez que

elementos do cavaco não se separam em zonas de cisalhamento. No caso WET, mais uma vez notam-se alterações nas cores resultantes em cada um dos processos.

### 3.5. Análise dos Resultados

Ao se olhar para o desgaste de flanco na ponta da ferramenta (Fig. 9), que é um dos principais indicadores de interesse deste trabalho, nota-se que, embora estas condições apresentem variações, a condição RQL apresentou substancial vantagem quanto ao tempo de vida esperado para o inserto, pois além de começar de valores de desgastes menores já nos primeiros instantes do torneamento, tem uma taxa de desgaste incremental menor que a WET.

Numa perspectiva mais holística, percebe-se que os comportamentos observados para as condições WET e RQL são bastante análogos, tanto do ponto de vista das forças de usinagem (Fig. 11) como da rugosidade resultante na superfície usinada (Fig. 12).

Do ponto de vista da retirada de calor e formação do cavaco, a condição RQL indica algumas desvantagens, mas são de menor importância, visto que estas não impactam de forma importante na vida da ferramenta e nem na qualidade da peça usinada.

A condição RQL+MLG, por sua vez, não se mostrou promissora para os critérios avaliados neste trabalho. Além de apresentar um crescimento exponencial na taxa de desgaste da ferramenta de corte, o que reduziria significativamente o seu tempo de vida, também apresentou nos esforços de torneamento crescimentos não-lineares e superiores aos das demais condições (embora tenha gerado as menores rugosidades médias). Uma possível explicação para esta observação é que, durante o processo de corte, o empilhamento das camadas do grafeno vai diminuindo por cisalhamento, podendo chegar na segregação total. Nesse estado, sendo bidimensional, o grafeno não ocupa um espaço suficientemente grande entre as superfícies peça-ferramenta, não facilitando a entrada do fluido para formação do filme lubrificante. Esta que seria uma das funções da aplicação de nano partículas (Benedicto *et al.*, 2017). Associado a isso, se sabe que a estrutura hexagonal do grafeno tem uma forte ligação química, ou seja, tem alta capacidade a resistir a deformações ou sofrer rompimento (Baptista, 2003), tornando-se assim um material de caráter abrasivo, que provocaria o aumento da taxa de desgaste registrada no ensaio com essa condição de lubrificação.

## 4. CONCLUSÕES

Com base nos ensaios de vida realizados, constatou-se que a utilização de fluido em quantidade reduzida (RQL) aplicada a 1,75 L/h sem a adição de flocos de grafeno multicamadas (MLG) é a condição mais adequada para o torneamento de acabamento do aço inoxidável AIS 420 C endurecido a 55 HRC com inserto de metal-duro com grãos ultrafinos e revestimento PVD/TiAlN (HiPIMS).

A condição RQL não só possibilitou uma menor taxa de desgaste de flanco na ponta do inserto, como também gerou forças de menor intensidade durante a usinagem, sem prejudicar sensivelmente a qualidade da superfície usinada resultante, ou gerar cavacos com características inconvenientes durante o processo. Além disso, dentre as analisadas, é a condição que melhor atende aos critérios ambientais por se valer de baixas quantidades de fluido, geralmente nocivos à natureza, e às condições financeiras, por ser de baixo consumo.

Não foram observadas vantagens significativas do uso de MLG sobre as condições avaliadas. Embora essa é a condição que gerou as menores rugosidades médias, a vida da ferramenta e os esforços de usinagem sofreram uma influência negativa devido à sua aplicação.

Como estudos complementares, sugere-se uma análise mais detalhada dos desgastes no flanco e na face, se possível envolvendo Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) conciliada à Espectroscopia por Energia Dispersiva (EDS). Sugere-se também repetir as condições do ensaio RQL usando um corpo de prova com dimensões que permitam o torneamento até a falha catastrófica da aresta de corte do inserto.

## AGRADECIMENTOS

Ao LAUS, em especial ao Prof. Dr. André João de Souza, coordenador do grupo e orientador deste trabalho, e ao técnico Guilherme Vargas Schirmer; aos laboratórios LAPMA e LACER; aos colegas Wilson Trindade Urasato e Lourenço Rad Miranda, pela ajuda na realização dos ensaios; à empresa Walter Tools, pela generosa doação dos insertos.

## REFERÊNCIAS

- ASTHAKOV, V.P.; Davim, J.P. Tools (Geometry and Material) and Tool Wear. In: Davim, J.P. “Machining: Fundamentals and Recent Advances”, **Springer**, 2008.
- BALANDIN, A.A.; GHOSH, S.; BAO, W.; CALIZO, I.; TEWELDEBRHAN, D.; MIAO F.; LAU, C.N. “Superior Thermal Conductivity of Single-Layer Graphene”, **Nanoletters**, v. 8, n° 3, p. 902-907, 2008.
- BAPTISTA, DANIEL LORSCHREITER. “Novas Fases Amorfas de Carbono Produzidas por Irradiação Iônica de Filmes de C<sub>60</sub>,  $\alpha$ -C e  $\alpha$ -C:H”. **Tese de Doutorado**, Instituto de Física, UFRGS, 2003.
- BENEDICTO, E.; CAROU, D.; RUBIO E.M. “Technical, Economic and Environmental Review of the Lubrication/Cooling Systems used in Machining Processes”, **Procedia Engineering**, v. 184, p. 99-116, 2017.
- BONDMANN. Disponível em: [www.bondmann.com.br/produto-fluid-b90-prod-239.html](http://www.bondmann.com.br/produto-fluid-b90-prod-239.html). Acesso em 28/09/2019.
- BONIARDI, M.; CASAROLI, A.; “Stainless Steel”. **Lucefin Divisione**, 235 p, 2014.
- ÇAKIR, M. C.; CIHAT, E.; ILKER, D. “Mathematical modeling of surface roughness for evaluating the effects of cutting parameters and coating material”, **Journal of Materials Processing Technology**, v. 209, p. 102–109, 2009.
- CARVALHO, A.C.S. “Análise da furação do aço inoxidável AISI 304 com a aplicação externa de nanofluidos em quantidade reduzida”, **Dissertação de Mestrado**, PROMEC, UFRGS, 2018.
- CARVALHO, A.C.S.; SOUZA, A.J.; GELAMO, R. “Esforços de corte na furação do AISI 304 com aplicação de nanofluido MLG em RQL”. **Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, São Carlos, SP. 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2019.
- DAVIM, J.P.; “Machining: Fundamentals and Recent Advances”, **Springer-Verlag**, London, 2008.
- DEBNATH, S.; Reddy, M.M.; Yi, Q.S. “Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: a review”, **Journal of Cleaner Production**, v. 83, p. 33-47, 2014.
- DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. “Tecnologia da usinagem dos materiais”. **Artliber Editora**, São Paulo, 8ª ed., 2013.
- DIXIT, U. S.; DAVIM, J. P.; SARMA, D. K. **Environmentally Friendly Machining**. Springer, p. 1-94, 2012.
- FAVORIT; “Aço AISI 420 C”. Disponível em: [www.favorit.com.br/produtos/acos-inoxidaveis/aco-aisi-420-c](http://www.favorit.com.br/produtos/acos-inoxidaveis/aco-aisi-420-c). Acesso em: 26/10/2019.
- FONSECA, A.F. “Mini-Curso: Introdução às propriedades físicas e estruturais do grafeno e dos nanotubos de carbon”. **Tese de Doutorado**. Instituto de Ciências Exatas, UFF, 2011.
- JUSTINO, C.I.L.; GOMES, A.R.; FREITAS, A.C.; DUARTE, A.C.; ROCHA-SANTOS, T.A.P. “Graphene Based Sensors and Biosensors”, **Analytical Chemistry**, 2017
- KISTLER. Disponível em: [www.kistler.com/?type=669&fid=79524&model=document/](http://www.kistler.com/?type=669&fid=79524&model=document/). Acesso em 28/09/2019.
- KLOCKE, F.; “Manufacturing Processes 1, Cutting”, **Springer-Verlag**, Berlin, 2011.
- LASOCKA, I.; SZULC-DĄBROWSKA, L.; SKIBNIEWSKI, M.; SKIBNIEWSKA, E.; STRUPINSKI, W.; PASTERNAK, I.; KMIEĆ, H.; KOWALCZYK, P. “Biocompatibility of Pristine Graphene Monolayer: Scaffold for Fibroblasts”, **Toxicology in Vitro**, v. 48, p. 276-285, 2018.

- LEE, E.; WEI, X.; KY SAR, J.W.; HONE, J. “Measurement of the Elastic Properties and Intrinsic Strength of Monolayer Graphene”, **Science**, v. 321, p. 385-388, 2008.
- LI, M.; XIONG, P.; YAN, F.; LI, S.; REN, C.; YIN, Z.; LI, A.; LI, H.; JI, X.; ZHENG, Y.; CHENG, Y. “An Overview of Graphene-Based Hydroxyapatite Composites for Orthopedic Applications”, **Bioactive Materials**, v. 3, p. 1-18, 2018.
- MACHADO, A.R.; ABRÃO, A.M.; COELHO, R.T.; SILVA, M.B. “Teoria da usinagem dos materiais”. 3ª ed. São Paulo, **Editora Blucher**, 2015.
- MAHMOUDI, T.; WANG, Y.; HAHN, Y.B. Graphene and its Derivatives for Solar Cells Application, **Nano Energy**, 2018.
- NAG A, MITRA A, MUKHOPADHYAY SC, “Graphene and its Sensor-Based Applications: A Review”, **Sensors and Actuators: A Physical**, 2017.
- NASSIF, F. P.; ROSA, G. C.; SOUZA, A. J. “Analysis of the Resulting Machining Forces by Using Standard and Wiper Cutting Tools in Dry Finish Turning of AISI 420”, **22<sup>nd</sup> International Congress of Mechanical Engineering (Annals of the XXII COBEM)**, Ribeirão Preto, SP, Brazil, 2013.
- NOORDIN, M. Y.; KURNIAWAN, D.; TANG, Y.; MUNISWARAN C. K. “Feasibility of mild hard turning of stainless steel using coated carbide tool”, **International Journal Advanced Manufacture Technology**, v. 60, pp 853-863, 2012.
- NOVOSELOV, K.S. “Graphene: Materials in the Flatland”. **Reviews of Modern Physics**, v. 83, 2011. doi: 10.1103/RevModPhys.83.837.
- NOVOSELOV, K.S.; FALKO, V.I.; COLOMBO, L.; GELLERT, P.R.; SCHWAB, M.G.; KIM, K. “A Roadmap for Graphene”, **Nature**, v. 490, p. 192-200, 2012.
- QUIMATIC. Disponível em: [www.quimatic.com.br/produtos/usinagem/quimatic-jet/](http://www.quimatic.com.br/produtos/usinagem/quimatic-jet/). Acesso em 28/09/2019.
- ROSA, G.C. “Estudo da Usinabilidade no Torneamento a Seco do Aço Inoxidável Martensítico AISI 420 C Endurecido com Ferramenta de Metal-Duro”, **Tese de Doutorado**, Engenharia Mecânica, UFRGS, 2017.
- SANDVIK COROMANT. **Manual Técnico de Usinagem**, São Paulo, 2012.
- SMITH, G.T.; “Cutting Tool Technology”, **Springer-Verlag**, London, 2008.
- SOUZA, A. C.; NOVASKI, O.; OLIVEIRA PAMPLONA, E.; BATOCCHIO, A. “Condições econômicas no Processo de Usinagem: Uma Abordagem Para Consideração dos Custos”. **Editora Unicamp**, 2001.
- SOUZA, A. J., RODRIGUES, R. I. e ROSA, G. C. “Verificação das forças geradas no torneamento a seco, com fluido em abundância e em quantidade reduzida do aço AISI 420 C utilizando ferramenta wiper”, **9o Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, Fortaleza, 2016.
- SOUZA, A. J.; “ENG03343 – Processos de Fabricação por Usinagem”, **GPFAl-DEMEC-UFRGS/Apostila**, 2011.
- SULTAN, A.Z.; SHARIF, S.; KURNIAWAN, D. Chip Formation When Drilling AISI 316L Stainless Steel using Carbide Twist Drill, **Procedia Manufacturing**, v. 2, p. 224-229, 2015.
- TRENT, E.M.; WRIGHT, P.K.; “Metal Cutting”, 4.ed., **Butterworth-Heinemann**, 2000.
- TSCHÄTSCH, H.; “Applied Machining Technology”, 8.ed., **Springer Science**, 2009.
- WALTER TOOLS. Disponível em: [www.walter-tools.com/en-gb/search/pages/default.aspx#/product/TNMG160404-NMS%20WSM01](http://www.walter-tools.com/en-gb/search/pages/default.aspx#/product/TNMG160404-NMS%20WSM01). Acesso em 28/09/2019.
- YE, M.; ZHANG, Z.; ZHAO, Y.; QU, L. Review: Graphene Platforms for Smart Energy Generation and Storage, **Joule**, v. 2, p. 245-268, 2018.